

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.032

基于改进 TSO 算法的局部阴影下光伏阵列 MPPT 方法

刘实现,王宏华

(河海大学 人工智能与自动化学院,江苏 南京 211100)

摘要:针对在局部阴影条件下,光伏阵列的传统最大功率点跟踪方法易陷入局部最优解的问题,采用改进的金枪鱼群优化算法对局部阴影下的最大功率点进行跟踪,该算法引入了 Logistic 混沌映射和莱维飞行。在光照突变的情况下,与基于相同光伏阵列模型的传统金枪鱼群优化算法、PSO 算法和扰动观察法相比,该算法有更快的搜索速度,较好的鲁棒性,能更准确地寻找局部阴影情况下的最大功率点。

关键词:最大功率点跟踪;金枪鱼群算法;局部阴影;混沌映射;莱维飞行

中图分类号:TP183 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)01-0153-05

MPPT for Photovoltaic Array with Partial Shadow Based on Improved TSO

LIU Shixian, WANG Honghua

(College of Artificial Intelligence and Automation, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract:To address the issue of local optima easily trapped by traditional maximum power point tracking methods for photovoltaic arrays under conditions of local shading, an improved tuna swarm optimization algorithm is utilized to track the maximum power point under local shading, in which Logistic chaotic mapping and Levy flights are introduced. In cases of sudden changes in illumination, and compared with the traditional tuna swarm optimization algorithm, PSO algorithm, and perturb and observe method all based on the same photovoltaic array model, the improved algorithm demonstrates faster search speeds, better robustness and greater ability of accurately locating the maximum power point in situations involving local shading.

Keywords:MPPT; tuna swarm algorithm; partial shading; chaotic mapping; levy flights

0 引言

在“碳达峰、碳中和”的双碳目标下,国家着力发展绿色、安全的清洁能源^[1]。在此背景下,新能源发电技术已然成为近年来的热点研究方向,光伏发电技术则是应用最为广泛的清洁能源发电技术之一。然而在局部阴影情况下,光伏系统的输出功率波动很大,传统的优化算法如恒定电压法和扰动观察法^[2]容易使系统陷入局部最优解。为了解决这些问题,国内外学者将智能群体优化算法应用于多峰值最大功率点跟踪(MPPT)控制中,如粒子群算法、群体智能优化算法和模拟退火算法等。

尽管群体智能算法可以应对非线性问题,但是对于光伏阵列在局部阴影下存在的多峰值问题,工程上更关注系统的鲁棒性和运行时的系统振荡。金枪鱼群算法(tuna swarm optimization, TSO)是一种新型的群体智能算法,可以实现全局搜索,不仅适用于单目标优化问题,还能解决多目标优化问题,参数简单、高效且容易控制。但是该

算法可能会受限于个体的移动和协作方式,导致无法摆脱陷入局部最优解^[3]。

本文在传统金枪鱼群算法的基础上,通过引入 Logistic 混沌映射优化初始化种群分布和加入莱维飞行(levy flight)策略,帮助算法跳出局部最优解,从而减小振荡幅度和提高算法的收敛速度,以搜索到局部阴影下的最大功率点。

1 光伏阵列仿真分析

单块光伏电池的等效电路如图 1 所示^[4]。

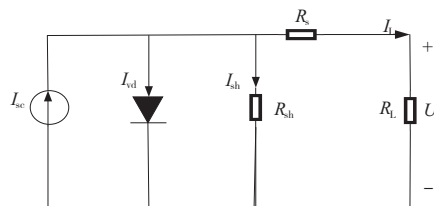


图 1 光伏电池等效模型

图 1 相应的解析模型为:

$$I_L = I_{sc} - I_{vd} - I_{sh} \quad (1)$$

$$I_{vd} = I_o \left[\exp \left(\frac{U_L + I_L R_s}{A} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$I_{sc} = I_L - I_o [\exp(AU_L) - 1] \quad (3)$$

$$I_{sh} = \frac{U_L + I_L R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

$$U_L = A \ln \left(\frac{I_{sc} - I_L}{I_o} + 1 \right) \quad (5)$$

$$A = \frac{nKT_c}{q} \quad (6)$$

式中: I_{sc} 是光生电流; I_{vd} 是通过 PN 结的暗流; I_{sh} 是等效旁路电流; I_L 是输出电流; I_o 是二极管的反向饱和电流; R_{sh} 是等效并联电阻; R_s 表示等效串联电阻; R_L 为负载; U_L 表示开路电压; n 是二极管的特征因子; q 是电子的电荷量 ($q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$); K 是玻尔兹曼常数 ($K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$); T_c 是光伏电池温度。

一般情况下, 光伏电池的等效串联电阻 R_s 很小, 而等效并联电阻 R_{sh} 却很大^[5], 在实际工程中要考虑到产生的偏差, 本文采用一种适合工程应用的近似仿真模型, 根据标准环境下光伏阵列的参数对不同环境下的光伏电池参数进行修正, 得到以下公式:

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (7)$$

$$\Delta I = \alpha \frac{S}{S_{ref}} \Delta T + \left(\frac{S}{S_{ref}} - 1 \right) I_{sc} \quad (8)$$

$$\Delta U = -\beta \Delta T - R_s \Delta I \quad (9)$$

$$I' = I + \Delta I \quad (10)$$

$$U' = U + \Delta U \quad (11)$$

式中: S 是光照强度; S_{ref} 是参考光照度, 取 $S_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$; T 是光伏阵列温度; T_{ref} 是其参考温度, 取 $T_{ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $\alpha = 0.00047 I_{sc}$; $\beta = 0.0032 U_L$ 。

2 光伏阵列局部阴影下的输出特性

光伏阵列一般由多块光伏电池串联和并联组成, 其输出特性在理想条件下可等效为单块光伏电池输出特性的线性叠加^[6], 光伏阵列串联和并联模型如图2和图3所示。

本文的光伏阵列仿真模型, 采用型号为 ASMS-180M 光伏阵列组件, 性能参数分别是: $P_{max} = 180 \text{ W}$, $U_{oc} = 45 \text{ V}$, $U_m = 36 \text{ V}$, $I_{sc} = 5.5 \text{ A}$, $I_m = 5 \text{ A}$, 参考温度是 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 参考光照强度是 1000 W/m^2 。在 Simulink 中建立光伏阵列模型, 对比仿真在系统初始状态采用参考光照强度, 在 0.2 s 后采用表1所示的突变光照强度。

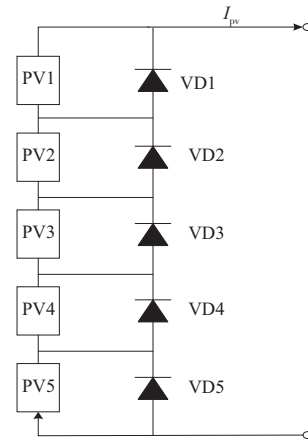


图2 光伏阵列串联

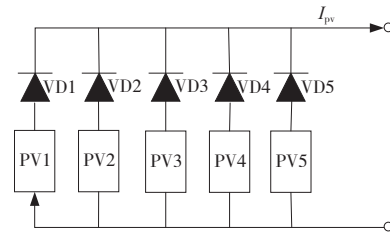


图3 光伏阵列并联

表1 光伏阵列光照强度 单位: W/m^2

光照情况	各组件的光照强度				
	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5
条件1	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
条件2	1 000	1 000	800	800	500
条件3	1 000	700	700	300	50
条件4	1 000	700	100	100	50

在表1所示的4种光照条件下仿真, 光伏阵列的输出 $I-V$ 特性和 $P-V$ 特性如图4—图7所示。

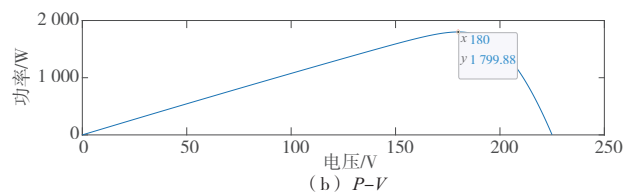
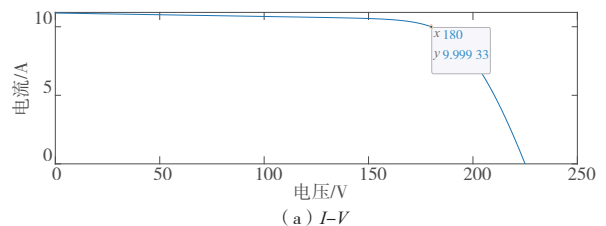
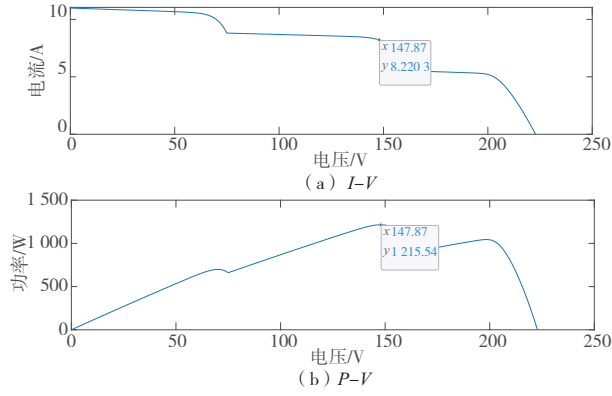
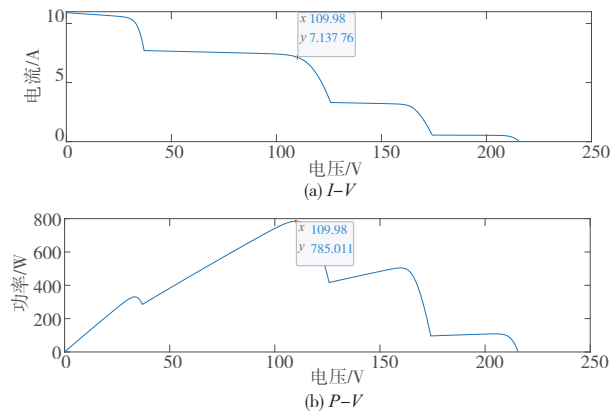
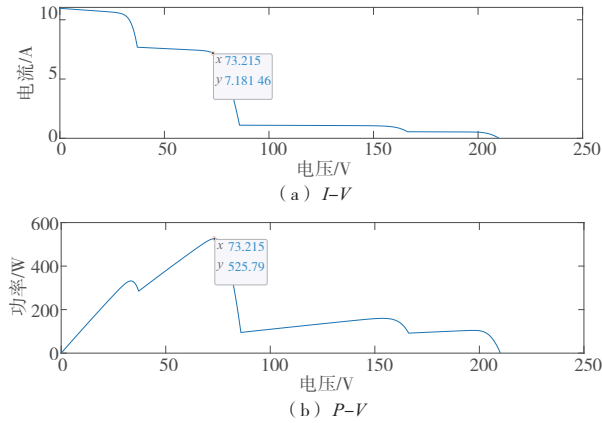


图4 条件1光照下 $I-V$ 、 $P-V$ 输出特性

图5 条件2光照下 I - V 、 P - V 输出特性图6 条件3光照下 I - V 、 P - V 输出特性图7 条件4光照下 I - V 、 P - V 输出特性

根据图4—图7的仿真结果,可以观察到在不同的光照条件下,光伏阵列串联组串的输出特性呈现出多峰值的曲线,包括 I - V 和 P - V 输出特性曲线。但相同光照条件下,光伏阵列并联组串的输出特性呈现为单峰值曲线。

由于串联结构和局部光照阴影对光伏阵列输出特性的影响是复杂而多样的,具体结果取决于阴影分布、光伏电池参数和系统设计等因素。本

文主要对光伏阵列串联结构在多种不同情况的局部阴影下进行分析。

3 改进的金枪鱼群优化算法 (HTSO)

金枪鱼群优化算法作为一种新型的群体智能优化算法,基本思想是模拟金枪鱼群体的行为方式,通过协作和信息交流来寻找最优解^[7]。金枪鱼群算法引入了一种自适应机制,能够根据问题的特性和解的质量自动调整算法的参数,这使得金枪鱼群优化算法在面对不同类型的问题时能够更好地提高求解效率。

$$X_i^{\text{int}} = \text{rand}(u_b, l_b) + l_b, \quad i = 1, 2, \dots \quad (12)$$

式中: X_i^{int} 表示第 i 个初始个体; u_b 和 l_b 分别表示搜索空间的上、下界。

分析式(12)可见,传统 TSO 算法的初始化种群只能保证金枪鱼在上、下界之间,但是分布情况却是随机的,容易出现分布不均的现象,从而导致算法在实际寻优应用过程中出现误差大的情况。

针对这个问题,本文采用 Logistic 混沌映射来生成初始种群^[8],使其分布更均匀,更好地覆盖搜索空间,帮助算法获得更强的全局寻优能力,避免出现极端的偶然结果,提高了算法的鲁棒性。

$$x_{i+1} = x_i \cdot \mu \cdot (1 - x_i) \quad (13)$$

式中: $\mu \in [0, 4]$ 被称作是 Logistic 参数,决定混沌映射的行为; x_i 表示第 i 次迭代的位置。

在面对复杂多维问题时,金枪鱼群会随解空间的随机值进行移动,这会使得寻优求解的过程中有较大概率陷入局部最优解,在此,引入莱维飞行(levy flight)策略^[9],使得算法在解空间搜索最优解的过程中有较高概率出现大跨步,从而增强算法实现最优解的能力,改进的公式如下:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} \alpha_1 \cdot (X_{\text{rand}}^t + \text{Levy}(D)) \cdot |X_{\text{rand}}^t - X_i^t| + \alpha_2 \cdot X_i^t, & i = 1 \\ \alpha_1 \cdot (X_{\text{rand}}^t + \text{Levy}(D)) \cdot |X_{\text{rand}}^t - X_i^t| + \alpha_2 \cdot X_{i-1}^t, & i = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \text{Levy}(x) = 0.01 \cdot \frac{u}{|v|^{\frac{1}{\lambda}}} \\ u \sim N(0, \sigma_u^2), v \sim N(0, \sigma_v^2) \end{cases} \quad (15)$$

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1+\lambda) \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right)}{\lambda \cdot \Gamma\left(\frac{1+\lambda}{2}\right) \cdot 2^{\frac{(\lambda-1)}{2}}} \right\}^{\frac{1}{\lambda}}, \sigma_v = 1 \quad (16)$$

$$\Gamma = \int_0^{+\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \quad (17)$$

式中: α_1 、 α_2 表示控制个体运动趋势的权重系数; D 表示迭代中个体位置的维数; N 表示正态分布; λ 为常数, 本文取 $\lambda = 1.5$; u 和 v 服从式(15)的正态分布; σ_u 和 σ_v 则服从式(16)^[10]。

改进金枪鱼群算法可以自然地并行化运行, 实现解空间的全局搜索, 并且每条金枪鱼可以独立探索解空间的不同部分。改进后的 TSO 算法流程如图 8 所示。

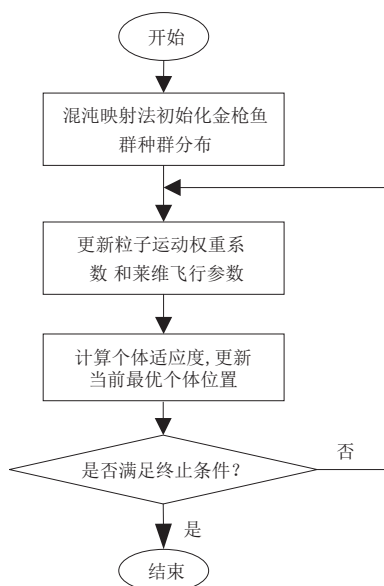


图 8 改进 TSO 流程图

4 仿真结果及分析

为了验证改进的金枪鱼群优化算法在多峰值 MPPT 控制中最大功率点跟踪的性能, 在 Simulink 中搭建基于 Boost 电路的光伏系统, 部分如图 2 所示, 本文将改进的金枪鱼群算法 (HTSO)、粒子群算法 (PSO)、扰动观察法 (P&O) 和传统金枪鱼算法 (TSO) 分别应用于 MPPT 控制中进行仿真, 仿真周期均设置为 0.4 s, 光照强度在 $t = 0.2$ s 之前为 $1\,000\text{ W/m}^2$, 在 $t = 0.2$ s 时突变如表 1 所示, 光伏阵列温度 T_{ref} 均取 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

由图 9—图 12 可见, 在全光照下, 4 种优化算法均能追踪到最大功率点, 而当光照突变到局部阴影的情况时, 扰动观察法、粒子群算法和金枪鱼群算法会不同程度地陷入局部最优解, 改进的金枪鱼群算法则能在 0.1 s 内快速追踪到最大输出功率点, 并且误差小于 1%, 同时使系统前期的收敛速度更快, 振荡幅度更小, 精度更高。

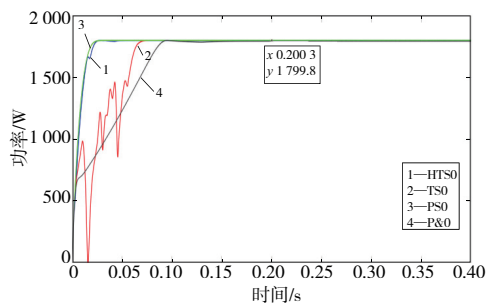


图 9 条件 1 下最大功率跟踪效果

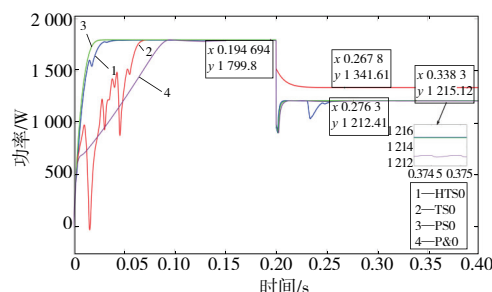


图 10 条件 2 下最大功率跟踪效果

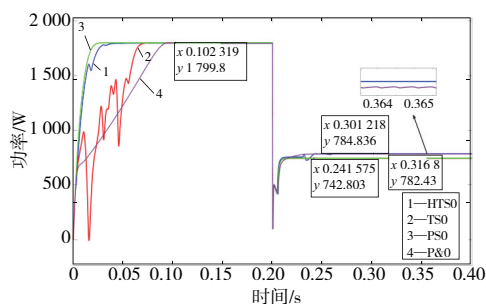


图 11 条件 3 下最大功率跟踪效果

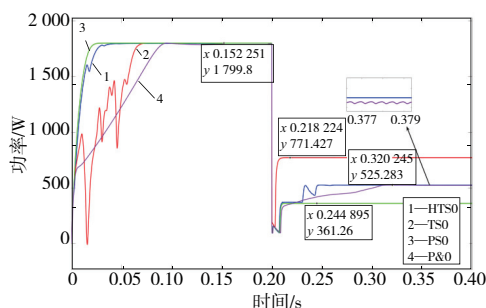


图 12 条件 4 下最大功率跟踪效果

5 结语

本文研究了一种改进的金枪鱼群优化算法, 并将其运用到光照突变至局部阴影时的光伏阵列最大功率点跟踪中。改进的金枪鱼群算法引入 Logistic 混沌映射机制对金枪鱼种群进行初始化,

同时引入莱维飞行机制对金枪鱼个体位置进行更新迭代,与其他 3 种算法的仿真对比表明:改进金枪鱼群算法在光照突变到局部阴影的情况下能够跳出局部最优点,找到系统的最大功率点,使系统的鲁棒性更好,实现更高的能量转换率。

参考文献:

- [1] 肖佳,梅琦,黄晓琪,等.“双碳”目标下我国光伏发电技术现状与发展趋势[J].天然气技术与经济,2022,16(5):64-69.
- [2] 郭世初,尹航帅,刘冬冬.基于扰动观察法的光伏电池 MPPT 控制算法优化[J].无线互联科技,2022,19(21):152-155.
- [3] XIE L, HAN T, ZHOU H, et al. Tuna swarm optimization: a novel swarm-based metaheuristic algorithm for global optimization [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2021: 9210050.
- [4] 王豪,王宏华.基于改进 PSO 的局部阴影下光伏阵列 MPPT 控制[J].机械制造与自动化,2020,49(1):

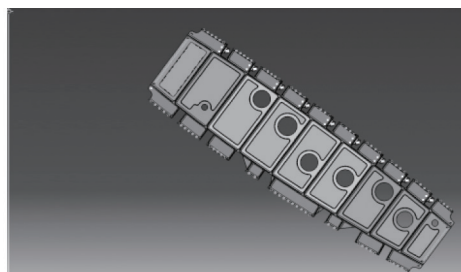
198-201.

- [5] 朱煜伟,刘梁挺.光伏电池输出特性及 MPPT 仿真[J].电子制作,2022,30(19):73-76.
- [6] 郭强,李红霞,李玉晓.基于改进粒子群算法的数控加工参数优化研究[J].机械制造与自动化,2021,50(3):132-135.
- [7] 李涵,李文敬.混合策略改进的金枪鱼群优化算法[J].广西科学,2023,30(1):208-218.
- [8] 党克,李鹏举,刘闯.基于变步长天牛须搜索算法的光伏系统 MPPT 控制研究[J].吉林电力,2019,47(5):27-31,36.
- [9] 梁田,曹德欣.基于莱维飞行的改进简化粒子群算法[J].计算机工程与应用,2021,57(20):188-196.
- [10] FU C X, ZHANG L X. A novel method based on tuna swarm algorithm under complex partial shading conditions in PV system [J]. Solar Energy, 2022, 248: 28-40.

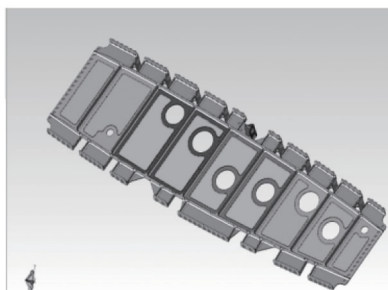
收稿日期:2023-10-25

(上接第 145 页)

始 MBD 模型的特征进行对比。验证表明轻量化模型中的连接关系、孔位属性、工程注释、模型属性定义、模型审签等信息,与 MBD 模型信息完全一致。轻量化模型数据为原模型大小的 7% 左右,满足了数字化工艺设计与仿真需求,如图 9 所示。



原始MBD模型



轻量化模型

图 9 基于 MBD 模型的轻量化处理

6 结语

本文针对 MBD 模型数据进行轻量化处理,对提取算法和压缩算法进行了研究并设计了数据轻量化硬件结构。采用改进的自适应哈夫曼压缩算法压缩数据,达到数据轻量化的目的,完成基于 MBD 模型轻量化处理和轻量化模型的生成,从而达到模型文件体积小、读取速度快、节约内存并在工艺设计过程中可快速浏览及应用的目的。

参考文献:

- [1] 周秋忠,范玉青.MBD 技术在飞机制造中的应用[J].航空维修与工程,2008(3):55-57.
- [2] 顾黎,李澍,王哲,等.面向重用的 MBD 模型本体知识库构建技术研究[J].航空制造技术,2017,60(18):100-105.
- [3] 罗爱民,殷国富,魏万迎,等.基于 Hausdorff 距离区域生长的缺陷边缘重建方法[J].机械工程学报,2007,43(4):132-137.
- [4] 董可静,陈伟,万渝,等.基于 Windchill 的三维装配大纲编辑及流程控制技术研究[J].机械制造与自动化,2022,51(4):152-156.

收稿日期:2023-05-26